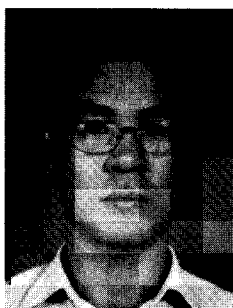


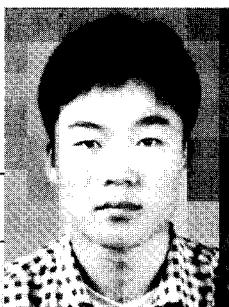
Tandem Pump용 Regulator의 기능분석 및 메카니즘해석



정 동 수

(KIMM 산업기술연구부)

- '88. 2 영남대학교 기계공학과(학사)
- '90. 2 영남대학교 기계공학과(석사)
- '90. 4 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



조 정 대

(KIMM 산업기술연구부)

- '94. 2 부경대학교 제어계측(학사)
- '96. 2 한국해양대학교 제어계측(석사)
- '96. 3 - 현재 한국기계연구원 연구원

1. 서 론

유압펌프는 엔진, 전기모타 등의 기계적인 에너지를 유압에너지로 변환시켜 유압실린더, 유압모타 등 기계적인 에너지 재변환 장치로 유압에너지를 공급한다. 유압에너지는 유압라인을 사용함으로써 기계적에너지에 비하여 동력전달에 대한 유연성이 크다는 장점은 있으나, 필요 이상의 에너지가 유압시스템에서 쉽게 외부로 방출됨으로써 에너지 손실이 크다는 큰 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하고 유압시스템의 효율성을 높이기 위하여 유압펌프는 각종기능을 내장하게 되며, 각종기능들은 유압펌프의 제어기(regulator)에 의하여 제어가 된다. 제어기는 유압펌프의 하우징에 내장 또는 하우징외부에 탑재되어진다.

유압펌프는 유압시스템 및 에너지 재변환장치(actuator)의 특성에 따라 내부 메카니즘 및 제어기능들이 달라진다. Tandem Pump는 건설중장비, 특히, 굴삭기에서 주펌프(main pump)로 사용되고 있으며 펌프의 형상에 따라 제어기를 1개 혹은 2개를 사용한다. 일본의 KAWASAKI(주), UCD(주)는 이들 펌프를 굴삭기에 적용한지 오래며, 국내는 이들 제품을 수입하거나, Licence로 생산하고 있는 실정이다. 국내에서는 독자모델을 개발하기 위하여 지금까지 꾸준히 연구하여 왔으나, Tandem Pump의 핵심기술인 제어기의 메카니즘해석, 동력선도분석, 그리고 설계기술개발이 난해하기 때문에 독자모델을 개발하지 못하고 있는 실정이다. Tandem Pump는 1대의 구동부

(driver), 즉 1개의 동일축상에 전마력 보상역할을 하는 2대의 펌프로 구성되어 있으며 전마력관계가 없는 2단펌프(double pump)와는 구분하여 명명한다. 굴삭기용 Tandem Pump의 제어기는 5가지 제어기능을 보유하고 있는데 이러한 5가지 제어기능은 다음과 같다.

- 네거티브 유량제어(negative flow control)
- 정마력제어(constant horsepower control)
- 전마력제어(total horsepower control)
- 최대압력제어(pressure cut-off control)
- 동력변환제어(power shift control)

본 연구에서는 5가지의 제어기능을 내장한 제어기의 기능분석, 메카니즘해석, 그리고 설계시 필요한 모델링 수식을 정립함으로써, 향후 유사기종의 유압펌프를 개발하고자 할 때 개발기간을 단축시키고 최적설계를 유도하는데 그 목적이 있다.

2. Tandem Pump Regulator의 기능분석

2.1 제어특성 curve

그림 1은 전단펌프제어기(front pump regulator)의 5가지 제어기능curve를 나타내고 있다. 5가지 기능들은 서로 복잡하게 합성되어질 수 있음을

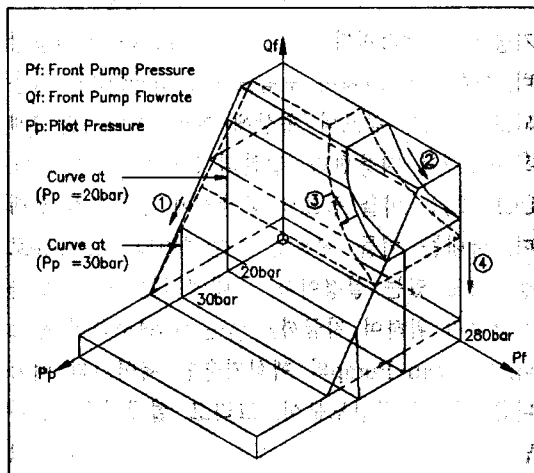


그림 1. 제어기(regulator)의 제어특성 curve

나타내고 있다. ①의 curve는 네거티브 유량제어로서 시스템의 파이롯트압력(P_p)이 증가할수록 토출유량(Q_f)은 감소된다. ②의 curve는 정마력제어로서 토출압력(P_f)이 증가할수록 토출유량(Q_f)은 감소된다. ③의 curve는 동력이 감소하는 형상으로서 전마력제어 또는 동력변환제어일 때 나타난다. ④의 curve는 최대압력제어로서 일정압력이상이 되면 토출유량(Q_f)이 급속도로 감소됨을 알 수 있다.

2.2 기능분석

2.2.1 네거티브 유량제어(negative flow control)

유압펌프에서 토출된 유량은 유압 actuator에 활용되고 여분의 유량은 오일탱크로 회수된다. 회수되는 유량만큼 에너지는 낭비된다. 이러한 회수유량을 감지하여 그 유량만큼 유압펌프의 토출유량을 줄여주는 것이 필요하다. 즉, 회수유량이 증가하게 되면 회수라인에 설치된 오리피스(orifice)에 의하여 교축현상이 발생되어 압력이 상승하게 되고, 압력신호에 비례하여 유압펌프의 토출유량을 감소하게 되는 제어방식이 네거티브 유량제어이다.

2.2.2 정마력제어(constant horsepower control)

구동기(driver)에 의하여 구동되는 유압펌프는 구동기의 동력을 최대한 활용하도록 설계됨으로써 유압펌프의 동력발생능력을 극대화한다. 달리 표현하자면, 유압펌프의 동력은 압력과 유량의 비로서 표현되는데 만약, 유압actuator에서 큰 부하가 생성되면 압력이 증가하게 되고 토출압력신호에 비례하여 유량이 감소하게 되는데 이 제어방식이 정마력제어이다.

2.2.3 전마력제어(total horsepower control)

Tandem Pump는 1대의 구동기로부터 동력을 공급받기 때문에 2대 유압펌프의 동력 합은 구동기 동력을 초과하지 않아야 한다. 2대의 유압

펌프가 동시에 작업을 수행할 때 전단펌프(front pump)는 후단펌프(rear pump)의 동력에 의하여 동력전도가 가변되게 된다. 상대펌프의 동력을 인식하기 위하여, 전단펌프의 제어기는 후단펌프의 토출압력을 항상 감지하고 있다.

2.2.4 최대압력제어(pressure cut-off control)

유압펌프는 유압actuator의 부하에 따라 압력이 형성된다. 만약 유압actuator에 급부하 또는 과부하가 발생하게 되면 유압펌프에는 초과압력이 형성됨으로써 유압펌프 및 유압시스템은 치명적인 손상을 입게 된다. 유압actuator에 급부하 또는 과부하가 발생하게 되었을때 유압펌프의 유량을 최소화시켜 초과압력이 강하되어 유압시스템의 안전을 유지한다. 유압시스템에 안전밸브(relief valve)가 설치되는 경우와 비교한다면 동력손실이 방지하게 되는 잇점이 있다. 이때 유압actuator는 더 이상 작업을 수행할 수 없는 상황이 된다.

2.2.5 동력변환제어(power shift control)

일반적으로, 구동부의 동력은 회전수에 따라 변한다. 회전수에 따라 구동부의 동력이 변하면 그에 따라 유압펌프의 동력도 가변되어야 한다. 건설중장비인 굴삭기에서는 유압펌프의 과동력으로 인하여 엔진의 회전수가 떨어지면(약 1800rpm이하) 엔진은 동력이 급속도로 저하되어 정지하게 된다. 속도센서는 그때 엔진속도를 감지하여 감압밸브로 신호를 보낸다. 감압밸브는 제어기에 압력을 상승시키고 그에 따라 제어기는 유압펌프의 유량을 감소시킴으로써 엔진의 정지를 방지한다.

3. Regulator의 메카니즘 해석 및 설계 수식

3.1 Regulator 작동메카니즘 해석

그림 2는 전단펌프의 제어기를 개념화 한 것

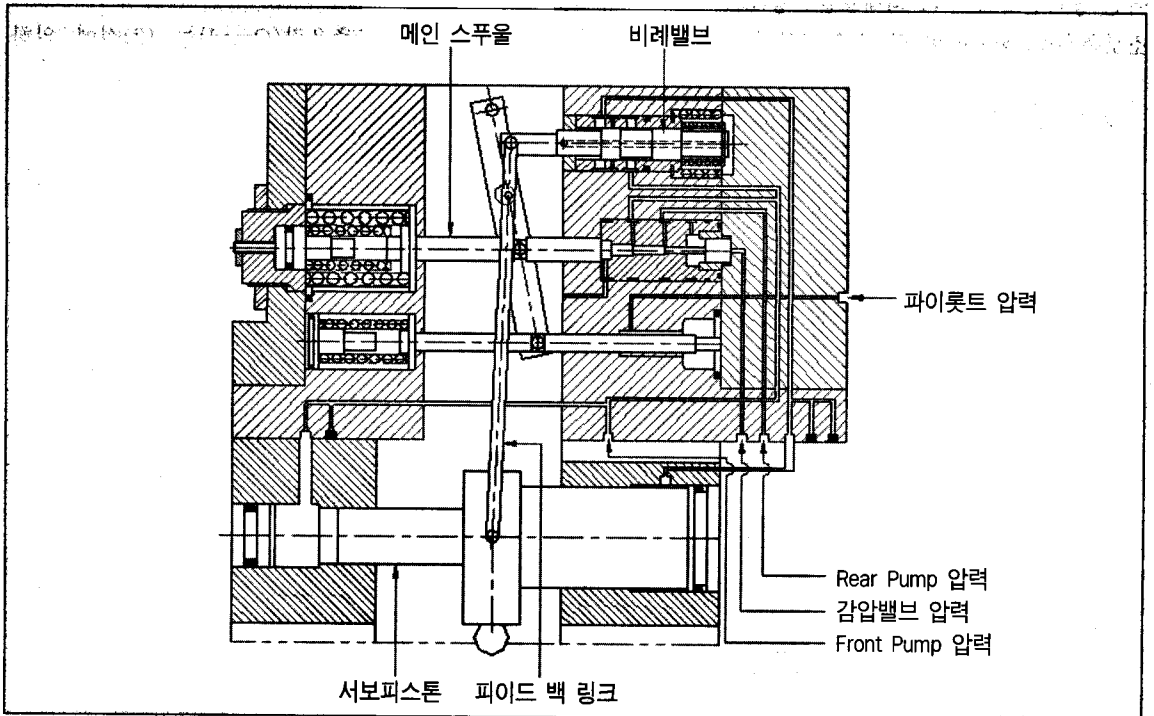


그림 2. 전단펌프제어기(front pump regulator)의 개념도

이다. 유압펌프의 사판에 연결되는 서보피스톤 (servo piston), 정마력, 전마력, 그리고 동력변환 제어용 메인스푸울(main spool), 네거티브 유량 제어용인 파이롯트 스푸울(pilot spool), 서보피스톤에 유압을 공급하여 서보피스톤의 변위를 제어하는 비례밸브(proportional valve), 그리고 펌프사판의 변위를 감지하는 피이드백 링크(feedback link)로 구성되어 있으며 최대압력제어기능은 생략되어있다. 후단펌프제어기는 동일한 구조로 후단펌프에 설치되어 있다고 보편된다. 파이롯트압력은 펌프외부에서 공급이 되며 감압밸브압력, 전단펌프(자신)토출압력과 후단펌프(상대)토출압력은 펌프하우징내에 유로가 형성된 구조이다.

3.2 Tandem Pump의 동력선도 분석

유압펌프의 설계목표인 사양을 구하고자할 때 먼저 구동부의 동력선도부터 분석한다. 그리고 주어진 동력선도로 부터 최대토출유량(Qpmax)과 최소토출유량(Qpmin)이 식(1)에 의하여 결정된다.

$$Q = \frac{450 \times HPW}{2 \times P} \quad (1)$$

$$Q_{pmax} = \frac{450 \times HPW}{2 \times P_{pmin}}$$

$$Q_{pmin} = \frac{450 \times HPW}{2 \times P_{pmax}}$$

최소토출압력(Pmin), 최대토출압력(Pmax), 그리고 중간토출압력(Pmed)는 (1)식을 미분한 (2)식, 외부스프링 식(3)과 내부스프링 식(4)에 의하여 구해진다.

$$\frac{dQ}{dP} = \frac{450 \times HPW}{2 \times P^2} \quad (2)$$

$$Q = a1 \times P + b1 \quad (3)$$

$$Q = a2 \times P + b2 \quad (4)$$

$$P_{min} = \frac{Q_{max} - b1}{a1}$$

$$P_{max} = -\frac{b2}{a2}$$

$$P_{med} = -\frac{(b1 - b2)}{(a1 - a2)}$$

그리고, 중간토출유량(Qmed)는 (3)식에 의하여 구해진다.

$$Q_{med} = a1 \times P_{med} + b1$$

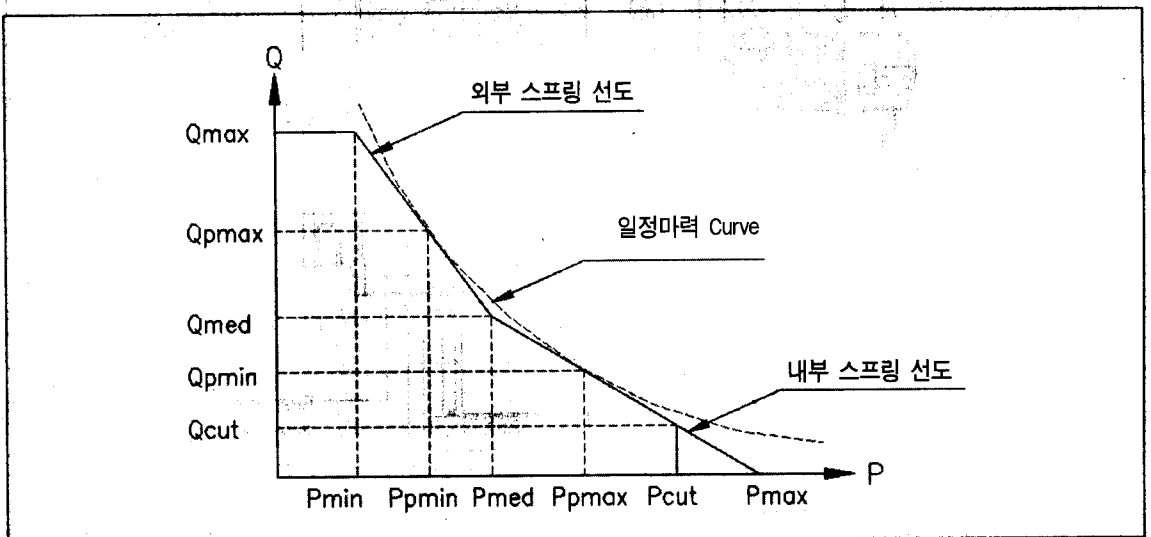


그림 3. Tandem Pump의 동력선도

표 1. Tandem Pump 설계사양

설계사양 조건		설계사양산출	
펌프의 입력동력 : HPW	96HP	Qpmax	172LPM
최소토출압력 : Ppmin	125bar	Qpmin	103LPM
최대토출압력 : Ppmax	210bar	Pmin	90bar
최대토출유량 : Qmax	220LPM	Pmax	420bar
-	-	Pmed	156bar
-	-	Qmed	129LPM

3.3 Regulator의 모델링 수식

동력의 선도를 최대한 유지하기 위하여 다종의 스프링을 사용할 수 있다. 그러나 스프링 수에 비례하여 구조가 복잡하기 때문에 통상 2종의 메인 스프링을 사용한다. 2종의 메인 스프링은 3종의 압력(정마력을 제어하기 위한 전단펌프의 압력, 전마력을 제어하기 위한 후단펌프의 압력, 동력변환을 제어하기 위한 감압밸브의 압력)을 공급받는 메인 스푸울(main spool)을 지지하고 있다. 그림 4에서 외부스프링은 초기에 Lxf1만큼 압축되어 있다. 이것은 최대토출유량(Qmax)이 유지되어질 수 있는 최소토출압력(Pmin)를 지정하기 위함이다. 그림 4의 마력제어용 메인스프링의 작동구조에서 유도된 식(5)

~식(8)로부터 외부스프링의 초기압축거리(Lxf1), 내부스프링의 여유거리(Lxf2), 2종스프링의 동시압축거리(Lxf3), 그리고 내부스프링 상수(Kfi)가 구해진다.

$$\frac{2 \times P_{min} \times A_f}{100} = K_{fo} \times L_{xf1} \quad (5)$$

$$\frac{2 \times P_{min} \times A_f}{100} = K_{fo} \times (L_{xf1} + L_{xf2}) \quad (6)$$

$$\frac{2 \times P_{min} \times A_f}{100} = K_{fo} \times (L_{xf1} + L_{xf2} + L_{xf3}) + K_{fi} \times L_{xf3} \quad (7)$$

$$\frac{Q_{max} - Q_{med}}{Q_{max}} = \frac{L_{xf2}}{L_{xf2} + L_{xf3}} \quad (8)$$

$$L_{xf1} = \frac{2 \times P_{min} \times A_f}{100 \times K_{fo}}$$

$$L_{xf2} = \frac{2 \times P_{min} \times A_f}{100 \times K_{fo}} - L_{xf1}$$

$$L_{xf3} = L_{xf2} \times \left(\frac{Q_{max}}{Q_{max} - Q_{med}} - 1 \right)$$

$$K_{fi} = \left(\frac{2 \times P_{min} \times A_f}{100 \times L_{xf3}} \right) - L_{xf2} \times \left(\frac{L_{xf2} + L_{xf2} + L_{xf3}}{L_{xf3}} \right)$$

파이롯트 스프링은 네거티브 유량제어를 위한 외부 파이롯트압력을 공급받는 파이롯트 스푸울을 지지하고 있다. 그림 5에서 파이롯트 스프링은 초기에 Lxs만큼 압축되어 있다. 이것은 최대

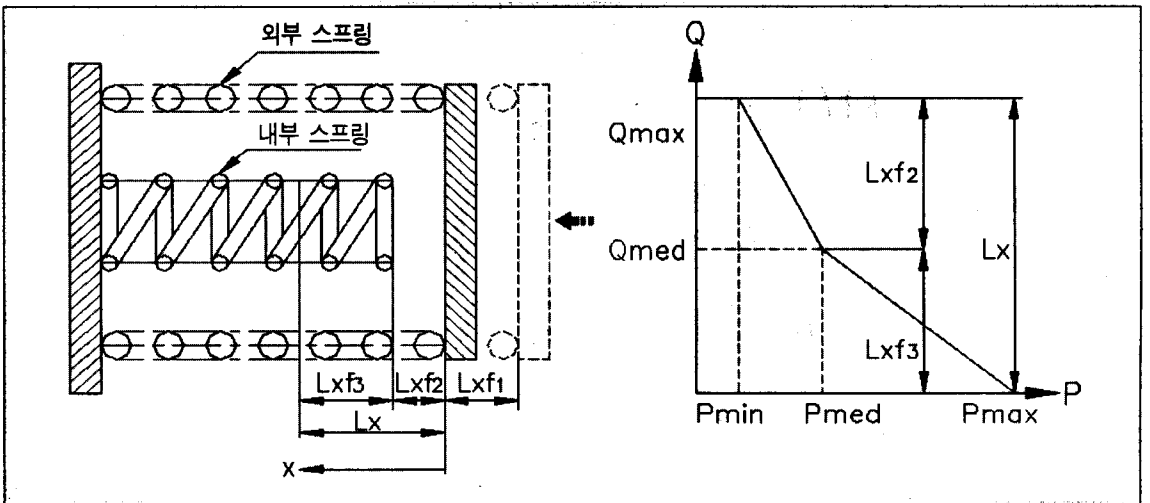


그림 4. 마력제어(정마력, 전마력, 동력변환)용 메인스프링의 작동구조